

DOI: 10.11779/CJGE20230850

# 竖向卸荷下砂土和粉质黏土力学特性试验研究

吴楷<sup>1,2,3</sup>, 陈仁朋<sup>\*1,2,3</sup>, 孟凡衍<sup>1,2,3</sup>, 胡博<sup>2</sup>

(1. 湖南大学地下空间先进技术研究中心, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 土体极限卸荷比和临界卸荷比是确定基坑底扰动区深度的重要指标。基于福建标准砂和福州粉质黏土开展了多组竖向卸荷试验, 根据归一化回弹变形确定了土体卸荷比特征值。试验结果表明: 竖向卸荷下土体表现出三阶段回弹变形规律; 小于临界卸荷比时, 土体回弹变形可忽略不计; 而大于极限卸荷比时, 土体回弹变形、侧压力系数快速增加, 回弹模量和剪切模量显著弱化, 水平残余应力比出现拐点且开始下降。此外, 针对既有卸荷试验研究, 总结了试验手段和卸荷比特征值的判断依据, 并给出黏性土、粉土和砂土等土体的卸荷比特征值统计均值。

**关键词:** 开挖卸荷; 扰动; 卸荷比; 剪切波速; 侧压力系数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)10-2174-09

**作者简介:** 吴楷(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事土拱效应和城市地下空间等方面的研究。E-mail: wukai0704@hnu.edu。

## Experimental study on mechanical behavior of sand and silty clay under vertical unloading

WU Kai<sup>1,2,3</sup>, CHEN Renpeng<sup>1,2,3</sup>, MENG Fanyan<sup>1,2,3</sup>, HU Bo<sup>2</sup>

(1. Research Center for Advanced Underground Space Technologies of Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The ultimate unloading ratio and the critical unloading ratio are the crucial parameters for determining the depth of disturbance below excavation base. The vertical unloading tests are performed on the Fujian sand and Fuzhou silty clay, with characteristic unloading ratios determined based on the normalized resilience value. The results indicate that the unloading response of soils changes in three phases. When the loading ratio is less than the critical unloading ratio, the response of soils can be ignored. Meanwhile, as the loading ratio exceeds the ultimate unloading ratio, the normalized resilience value and lateral pressure coefficient of soils increase rapidly, and the resilience modulus and shear modulus decrease significantly. Additionally, at this point, the horizontal residual stress ratio displays an inflection point and begins to decline. Furthermore, the test methods and the judgment criteria of characteristic unloading ratios are analyzed. The statistical mean values of the characteristic unloading ratios of clay, silt and sand in the unloading tests are calculated.

**Key words:** excavation unloading; disturbance; unloading ratio; shear wave velocity; lateral earth pressure coefficient

## 0 引言

近年来, 城市地下空间趋于密集化、立体化, 基坑开挖所面临的变形控制挑战愈发突出。上部土体开挖卸载会导致基坑底出现扰动区, 易诱发下方既有地下结构发生过大变形, 严重威胁既有地下结构的正常服役和运营安全<sup>[1-3]</sup>。明确基坑坑底土体卸荷响应规律对预测坑底扰动区深度和控制既有地下结构变形具有重要意义。

潘林有等<sup>[4]</sup>基于室内单元体试验提出卸荷比  $R$  以

定量描述土体卸荷水平, 定义为土体竖向卸荷应力与初始竖向应力之比。试验结果表明, 随竖向荷载逐级减小, 软黏土产生非线性回弹变形, 且回弹过程中存在两个特征值: 临界卸荷比  $R_{cr}$  和极限卸荷比  $R_u$ 。临界卸荷比  $R_{cr}$  以下, 土体回弹变形可以忽略不计, 而大于极限卸荷比  $R_u$  时, 土体回弹模量快速减小且回弹应变显著增加。基于大量室内试验和现场实测, 许多

收稿日期: 2023-09-04

\*通信作者 (E-mail: chenrp@hnu.edu.cn)

学者证实了粉土和砂土地层中也存在上述规律, 并根据卸荷下土体回弹量、回弹模量等参数提出了卸荷比特征值判定方法<sup>[5-7]</sup>。此外, 既有研究表明<sup>[4-17]</sup>土体的力学特性如抗剪强度、侧压力系数和残余应力, 也与卸荷水平密切相关, 在极限卸荷比  $R_u$  前后发生显著变化。

实际工程中基坑坑底回弹变形也存在类似规律。刘国彬等<sup>[15]</sup>基于大量坑底回弹实测案例提出考虑残余应力的回弹量算法, 并发现残余应力影响深度以下地层卸荷应力为零且回弹可忽略不计。上海市某地铁车站基坑工程<sup>[18]</sup>测试了坑底回弹沿深度的分布规律, 结果显示坑底以下 5 m (基坑深度的 1/3) 范围内地层贡献了近 3/4 的最大回弹量。Meng 等<sup>[19]</sup>基于深圳某隧道上方深基坑工程实测发现, 随基坑开挖深度增加, 当隧道残余覆土厚度小于某一临界值时隧道上浮量会急剧增加。《城市轨道交通结构安全保护技术规程: DB33/T1139—2017》<sup>[20]</sup>和《既有轨道交通盾构隧道结构安全保护技术规程: T/CCES 36—2022》<sup>[21]</sup>等规范中明确提出须控制地层卸荷影响范围以避免基坑下方既有隧道变形超限。根据基坑下卧地层的卸荷比特征值, 即临界卸荷比  $R_{cr}$  和极限卸荷比  $R_u$ , 可将坑底地层分为强扰动区、弱扰动区和稳定区进而为实际工程提供指导 (图 1) <sup>[4-5, 8]</sup>。

从国内外已有的研究看, 目前土体卸荷比特征值数据较少。限于试验条件, 既有研究的重点主要集中在卸荷下土体的回弹量、回弹模量等力学参数, 其他物理特性如剪切波速、侧压力系数的变化尚不明确, 不同土体的卸荷比特征值也缺少对比分析。本文针对福建标准砂和福州粉质黏土开展了多组竖向卸荷试验, 确定了试验土体的临界卸荷比  $R_{cr}$  和极限卸荷比  $R_u$ 。此外, 总结归纳了现有卸荷试验中各类土体的卸荷比特征值及其判定方法。研究结论可为预测坑底扰动区深度和控制基坑下方既有地下结构变形提供参考。

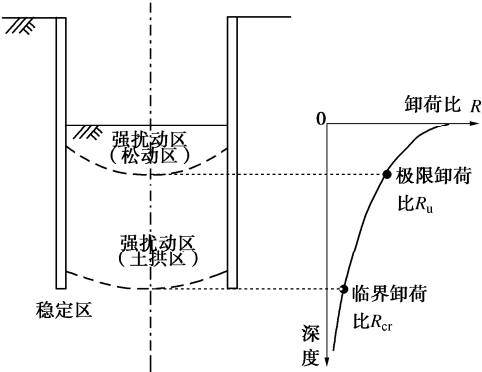


图 1 基坑底分区  
Fig. 1 Zoning of excavation base

1 卸荷试验方案

本文基于改装固结仪开展了多组竖向卸荷试验, 试验装置如图 2 所示。改装固结仪最小壁厚为 38 mm, 竖向荷载 3 MPa 下侧向应变小于  $10^{-5}$ 。仪器内壁贴有高分子材料 (聚乙烯薄膜) 可降低侧壁摩擦系数<sup>[22]</sup>, 试验过程中摩擦效应可忽略不计。仪器内嵌入弯曲元和水平应力传感器。试验通过千分表、弯曲元、应力传感器计分别监测各级卸荷下试样的回弹量、剪切波速和水平土压力。试验前, 对各传感器进行校准和标定。

试验试样尺寸为 61.8 mm×50 mm (直径×高度)。试验所用土体为福建标准砂 (干砂,  $D_r=75\%$ , 30%) 和福州粉质黏土 (饱和原状土, 含水率为 31.3%) 两类, 试样制备过程参考《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》<sup>[23]</sup>。福建标准砂的颗粒级配见图 3, 土体具体参数指标见表 1。

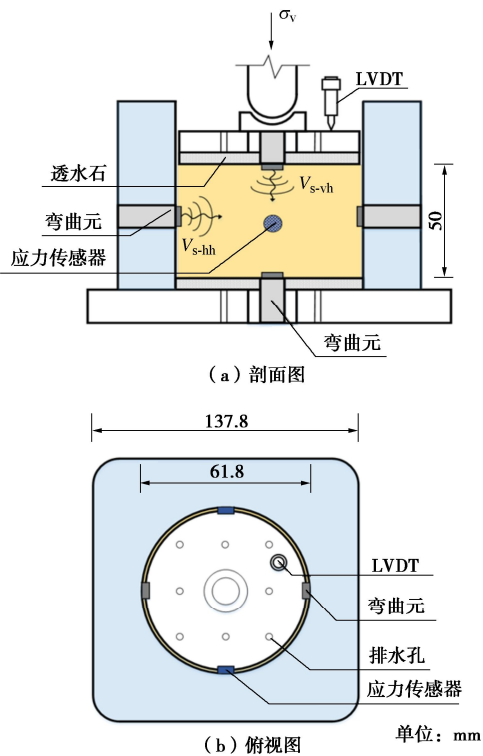


图 2 试验装置示意图  
Fig. 2 Diagram of test devices

表 1 试验土体物理参数

物理参数	福建标准砂		福州粉质黏土
	密实 $D_r=75\%$	松散 $D_r=30\%$	
干重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	15.55	14.22	—
饱和重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	—	—	19.2
有效内摩擦 角/( $^\circ$ )	34.4	30.3	27.0
有效黏聚力/ kPa	0	0	9.3

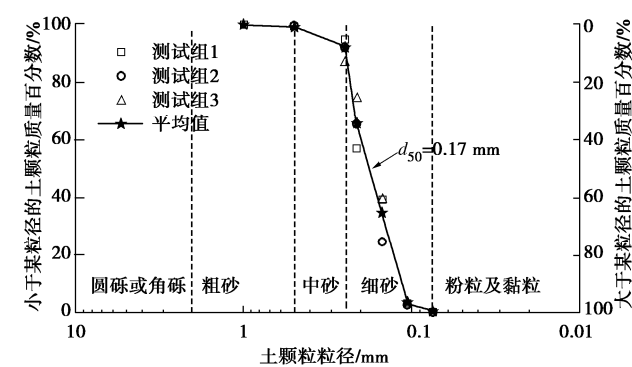


图3 福建标准砂级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of Fujian sand

试验具体工况如表 2 所示，其中福州粉质黏土试样的先期固结压力略大于 100 kPa，因此仅在 200, 400, 800 kPa 预压荷载开展试验。福建标准砂和福州粉质黏土试验条件分别为干燥和饱和。根据《土工试验方法标准：GB/T50123—1999》，每级加/卸载施加前应确保试样固结完成或该级荷载下试样变形不大于 0.01 mm/h。待试样变形稳定后，测定并记录各传感器数据。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes

项目	内容
土体种类	福建标准砂 ( $D_r=30\%$ , 75%) 福州粉质黏土
预压荷载/kPa	100, 200, 400, 800
卸荷比	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1

## 2 卸荷试验结果及分析

### 2.1 变量定义

为了分析卸荷下土体回弹变形等响应规律，采用以下参数及计算公式：

(1) 卸荷比  $R$  为土体竖向卸荷应力与初始竖向应力之比，即

$$R = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_i}{\sigma_{\max}} \quad (1)$$

式中： $\sigma_{\max}$  和  $\sigma_i$  分别为初始竖向荷载和某级卸荷下剩余竖向荷载。

(2) 割线回弹模量  $E_r$  为各级卸荷下应力增量与应变增量之比，即

$$E_r = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\varepsilon_v} \quad (2)$$

式中： $\Delta\sigma_v$  为某级卸荷下竖向应力增量； $\Delta\varepsilon_v$  为某级卸荷下竖向应变增量。

(3) 卸荷过程中，由于土颗粒间摩擦锁固、机械咬合效应和边界约束差异作用<sup>[24-26]</sup>，土体中存在水平残余应力。为定量描述水平残余应力的变化规律，定

义水平残余应力比  $\alpha$ ：

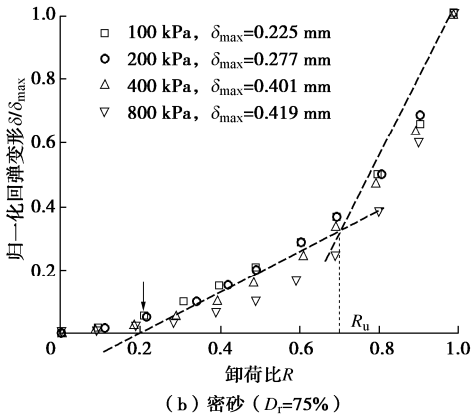
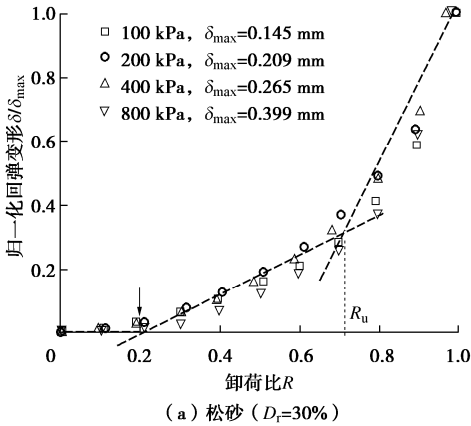
$$\alpha = \frac{\sigma_{hi} - K_0\sigma_{vi}}{K_0\sigma_{v0}} \quad (3)$$

式中： $\sigma_{hi}$  为某级卸荷下土体水平应力； $\sigma_{vi}$  为某级卸荷下土体所受上部荷载； $\sigma_{v0}$  为上部初始预压荷载； $K_0$  为正常固结状态下的土体侧压力系数。

### 2.2 归一化回弹变形

图 4 给出各组试样归一化回弹变形  $\delta/\delta_{\max}$ 。由图可知，各组试验归一化回弹变形  $\delta/\delta_{\max}$  随卸荷比  $R$  增加均呈非线性增长，表现出三阶段变化规律。卸荷比  $R<0.2$  时，土体回弹可忽略不计 ( $\delta/\delta_{\max}<10\%$ )。随后土体回弹随卸荷比  $R$  增加而逐渐增长。当卸荷比增加超过某一值时，归一化回弹变形曲线的斜率明显增加，土体产生显著回弹。对于两组砂土试样，卸荷比  $R$  为 0.8~1.0 时试样回弹量接近总回弹量的 60%。800 kPa 预压荷载下，卸荷比  $R$  为 0.9~1.0 时福州粉质黏土的回弹量接近最大回弹量的 80%。

卸荷比特征值是明确土体回弹特性的重要参数。考虑到基坑地层变形是基坑工程中的关注重点，本文基于上述归一化回弹变形曲线三阶段变化的“拐点”确定各试样土体卸荷比特征值，即临界卸荷比  $R_{cr}$  和极限卸荷比  $R_u$ 。根据试验结果，砂土和粉质黏土的临界卸荷比  $R_{cr}$  均为 0.2。两组砂土试样的极限卸荷比  $R_u$  均在 0.6~0.8，取中间值 0.7；粉质黏土试样极限卸荷比  $R_u$  在 0.7~0.9，取中间值 0.8。



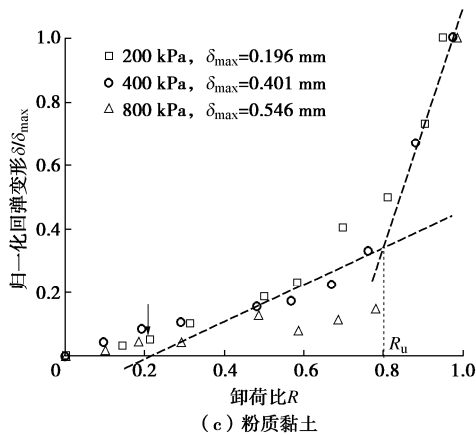


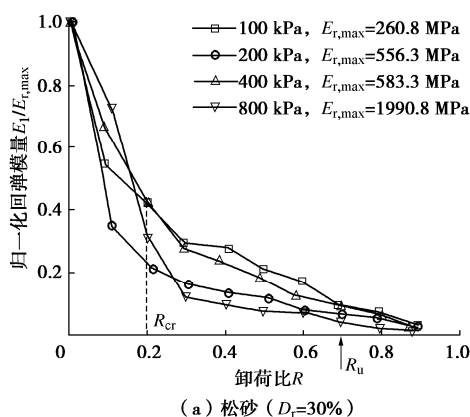
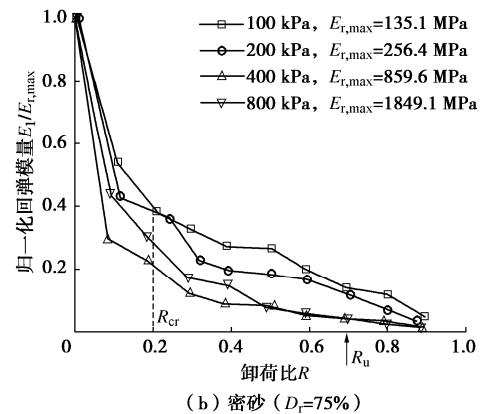
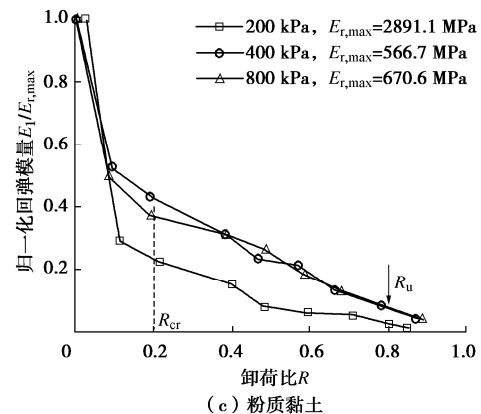
图 4 归一化回弹变形结果

Fig. 4 Normalized results of resilience value

相较于福建标准砂, 不同预压荷载下福州粉质黏土归一化回弹变形更离散, 极限卸荷比  $R_u$  更大。本试验中, 松砂和密砂归一化回弹变形  $\delta/\delta_{\max}$  随卸荷比  $R$  的变化规律相近, 这可能与加载过程有关。尽管制样时松砂 ( $D_r=30\%$ ) 和密砂 ( $D_r=75\%$ ) 试样的相对密度存在明显差别, 但在施加预压荷载的过程中该差别会逐渐减小。例如, 800 kPa 预压荷载下, 固结完成的松砂试样相对密度已接近 70%, 此时初始相对密度的影响难以在图中反映。

### 2.3 归一化回弹模量

各级卸荷下土体归一化回弹模量  $E_r/E_{r,\max}$  变化规律如图 5 所示。各组试样回弹模量表现出明显的应力相关性, 这与既有研究结论相符<sup>[4-6]</sup>。卸荷初期, 各组试样的回弹模量  $E_r$  均远大于达到极限卸荷比  $R_u$  之后的状态, 导致了该阶段回弹响应不明显 ( $\delta/\delta_{\max}<10\%$ , 图 4)。随卸荷比  $R$  增加, 各组试样回弹模量  $E_r$  均逐渐衰减。卸荷比  $R$  由 0 增加到临界卸荷比  $R_{cr}$  过程中, 各土体回弹模量均发生显著弱化。大于极限卸荷比  $R_u$  时, 回弹模量进一步减小。此外, 预压荷载大小对试样回弹模量  $E_r$  影响明显, 且主要体现在卸荷初期。以密砂为例, 卸荷比为 0.1 时, 800, 100 kPa 下试样的回弹模量  $E_r$  分别为 1990.8, 260.8 MPa。而卸荷比为 1.0 时, 两组试样回弹模量  $E_r$  分别为 22.2, 8.1 MPa。

(a) 松砂 ( $D_r=30\%$ )(b) 密砂 ( $D_r=75\%$ )

(c) 粉质黏土

图 5 归一化回弹模量结果

Fig. 5 Normalized results of resilience modulus

### 2.4 侧压力系数

图 6 给出半对数坐标系中各组试样超固结状态下侧压力系数  $K_{oc}$  随卸荷比  $R$  变化规律。根据经验公式, 加载过程中试样的  $K_0$  应约为  $1-\sin\varphi'$ , 其中  $\varphi'$  为土体内摩擦角, 如各图中虚线所示。分级加载过程中, 各组试样的  $K_0$  测试值 (未在图中给出) 均在理论值上下波动, 表明试验过程中侧壁摩擦效应可以忽略不计。

如图 6 所示, 各组试样的  $K_{oc}-R$  曲线也表现出明显的三阶段变化规律。随卸荷比  $R$  增加,  $K_{oc}$  逐渐增加大于  $K_0$ , 当卸荷比  $R$  小于临界卸荷比  $R_{cr}$  时,  $K_{oc}$  变化并不明显, 而当卸荷比  $R$  大于极限卸荷比  $R_u$  时,  $K_{oc}$  急剧增加。最后一级卸载下, 试样土体的侧压力系数  $K_{oc}$  接近 30, 显著大于  $K_0$ , 这说明土体中存在较大水平残余应力。Mayne 等公式<sup>[27]</sup>中超固结状态下土体侧压力系数  $K_{oc}=(1-\sin\varphi')OCR^{\sin\varphi'}$ , 其中 OCR 为土体超固结比, 可与卸荷比  $R$  互相换算。根据该公式, 卸荷时土体  $K_{oc}$  主要与内摩擦角  $\varphi'$  和土体超固结比 OCR (卸荷比  $R$ ) 相关, 本试验中各试样的  $K_{oc}-R$  曲线变化规律与预压荷载关系不明显, 这与既有结论相符。

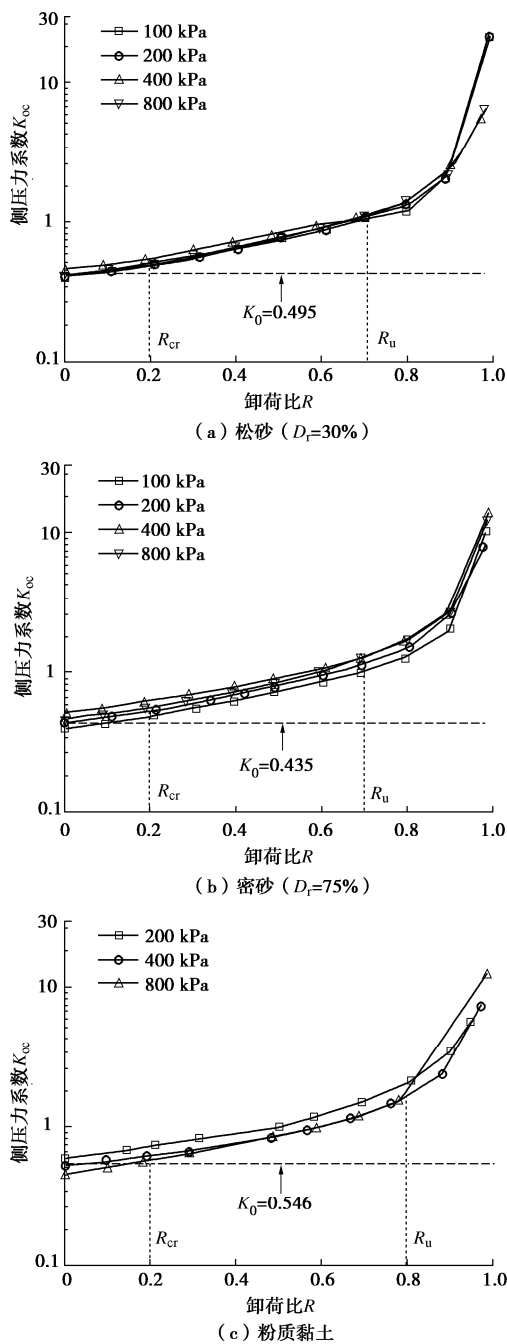


图 6 侧压力系数结果

Fig. 6 Results of lateral earth pressure coefficients

2.5 归一化剪切模量

图 7 给出各组试样归一化剪切模量与卸荷比  $R$  的变化规律,限于试验条件,福州粉质黏土未开展测试。本试验测试了试样剪切波速  $V_{s-vh}$  和  $V_{s-hh}$  (竖向传播水平向振动和水平向传播水平向振动),进而可以计算得到试样的剪切模量  $G = \rho V_s^2$ , 式中  $\rho$  为土体密度,  $V_s$  为剪切波速。此外,加载和回弹过程中土体竖向变形会导致上下一对弯曲元的间距发生改变,该现象对  $V_{vh}$  的影响已在计算中考虑并消除。

土体归一化剪切模量  $G_{vh}$  和  $G_{hh}$  随卸荷比  $R$  增加而减小。当卸荷比  $R$  小于临界卸荷比  $R_{cr}$  时,测试剪切模量衰减均小于 15%,而大于极限卸荷比  $R_u$  时,剪

切模量的衰减明显加剧。各级卸荷下密砂剪切模量一般大于松砂,但归一化结果的变化规律并无明显区别。根据 Hardin 公式<sup>[28]</sup>,土体剪切模量是应力水平、孔隙比和结构性参数的函数。剪切模量的变化可能与土体结构性弱化有关。当卸荷比  $R$  大于极限卸荷比  $R_u$  时单元体对应于基坑底松动区,该范围内土体剪切模量  $G_{vh}$ ,  $G_{hh}$  和回弹模量  $E_r$  均显著下降,极易导致地层产生过大变形,实际工程中应格外关注。

—□— 100 kPa,  $G_{hh, \max}=32.6$  MPa —○— 200 kPa,  $G_{hh, \max}=47.7$  MPa  
—△— 400 kPa,  $G_{hh, \max}=61.14$  MPa —▽— 800 kPa,  $G_{hh, \max}=91.5$  MPa  
—■— 100 MPa,  $G_{vh, \max}=66.7$  MPa —●— 200 MPa,  $G_{vh, \max}=130.9$  MPa  
—▲— 400 MPa,  $G_{vh, \max}=169.3$  MPa —▼— 800 MPa,  $G_{vh, \max}=252.5$  MPa

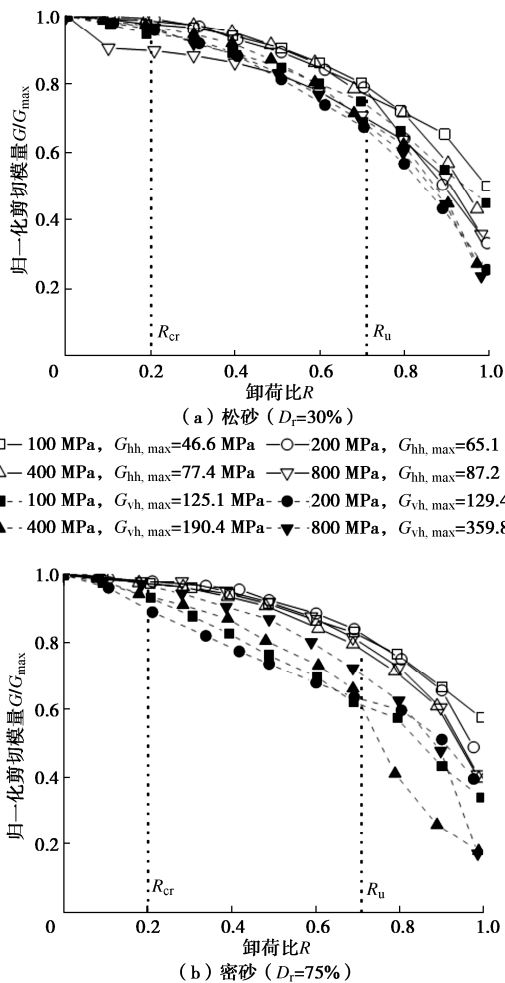


图 7 归一化剪切模量结果

Fig. 7 Normalized results of shear modulus

相同卸荷比下,水平向剪切模量  $G_{hh}$  的弱化程度小于竖向向  $G_{vh}$ 。以松砂为例,完全卸载时,竖向剪切模量  $G_{vh}$  衰减约达初始值的 80%,而水平向剪切模量  $G_{hh}$  约为 50%。考虑到本试验使用的福建标准砂颗粒并无显著组构各向异性,且卸载时土体侧压力系数  $K_{oc}$  远大于  $K_0$ ,这种土体剪切模量的各向异性可能与水平残余应力有关。

2.6 水平残余应力比

卸载后土体内会存在残余应力,残余应力由土颗



粒间摩擦锁固效应和边界约束差异所致, 显著影响卸载后土体力学状态<sup>[24-26]</sup>。由前文可知, 土体侧压力系数和剪切模量的变化规律可能与水平残余应力密切相关。图 8 给出水平残余应力比  $\alpha$  (2.1 节) 随卸荷比  $R$  变化规律。由图可知, 各组试样水平残余应力比  $\alpha$  随卸荷比  $R$  增加均先增后减, 最大值出现在极限卸荷比  $R_u$  附近, 大小约为 0.4~0.5。不同预压荷载下, 试样水平残余应力比  $\alpha$  表现出相似的变化规律, 而粉质黏土结果的离散性更大。值得注意的是, 当试样完全卸荷后, 水平残余应力比  $\alpha$  仍大于 0。此时水平残余应力比  $\alpha$  为土体内残余水平应力与初始水平应力之比, 各组试样结果均在 0.3~0.5。

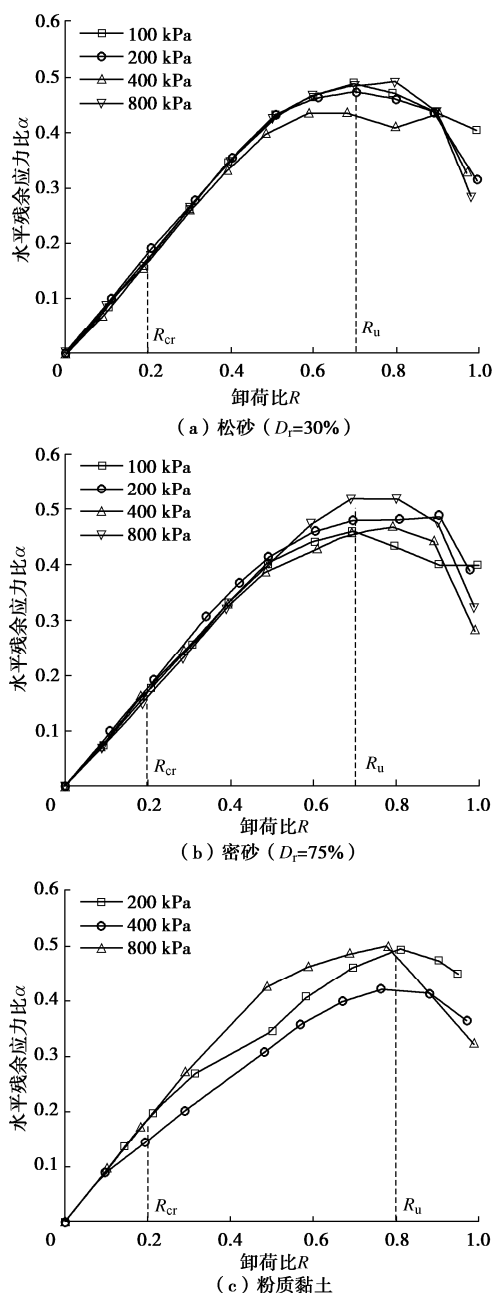
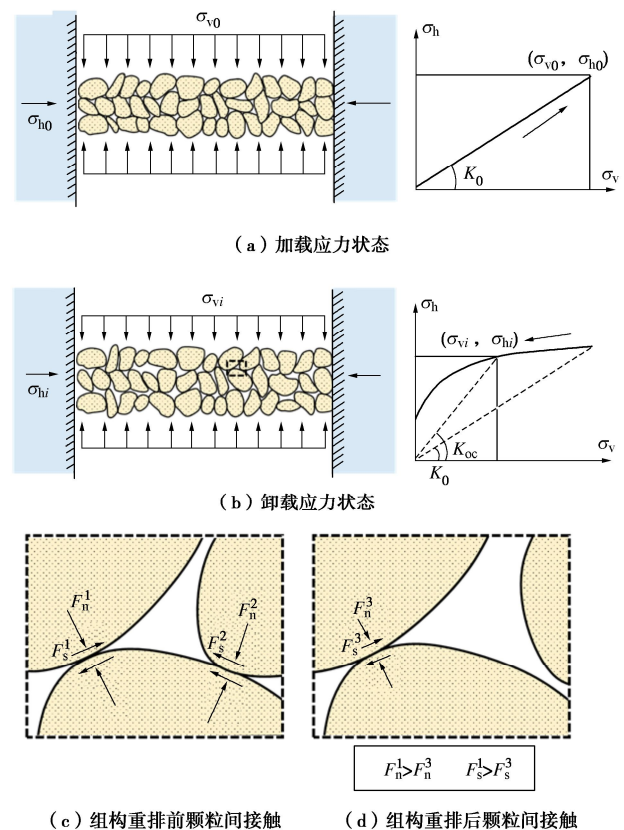


图 8 水平残余应力比结果

Fig. 8 Results of horizontal residual stress ratios

试验加卸载过程中土骨架所处状态如图 9 (a), (b) 所示。土体水平残余应力比  $\alpha$  的变化与土体回弹变形密切相关。当卸荷比  $R$  小于极限卸荷比  $R_u$  时, 土体变形响应较平缓 (图 4)。此时土结构体系尚未达到临界荷载, 试样内局部应力释放受到周围土体约束, 颗粒间存在摩擦锁固效应并随卸荷比增加而增强<sup>[25]</sup>。当卸荷比大于极限卸荷比  $R_u$  后, 各组试验中土体回弹变形均出现显著增长, 该阶段试样回弹量接近或大于总回弹量的 60% (图 4)。此时土体密实度降低, 结构性弱化。细观上表现为应变能显著释放, 组构重新排列。土颗粒发生位移和旋转, 颗粒间接触点减少、接触力 (法向力  $F_n$  和切向力  $F_s$ ) 下降 (图 9 (c), (d))。随持续卸载, 土结构体系达到临界荷载, 体系限制内力释放和位移恢复的最大锁存能力显著弱化<sup>[25-26]</sup>。颗粒间原有传力路径破坏, 摩擦锁固效应弱化, 进而导致水平残余应力比  $\alpha$  下降。



(c) 组构重排前颗粒间接触

(d) 组构重排后颗粒间接触

图 9 加卸载下土体应力状态示意图

Fig. 9 Schematic of stress state of soils under loading and unloading

根据既有研究, 基坑开挖会导致坑底产生土拱效应, 显著影响地层应力分布和变形响应<sup>[2,29]</sup>。土拱松动区内土体变形响应明显, 力学性能显著下降。实际基坑工程可基于土体极限卸荷比  $R_u$  预测松动区 (扰动区) 范围, 为保护下方既有地下结构措施提供参考。

表 3 卸荷试验案例  
Table 3 Cases of unloading tests

土体	案例	取土地点	试验手段	判断依据	$R_{cr}$	$R_u$
黏性土	1 <sup>[4]</sup>	温州	一维压缩试验	回弹变形	0.2	0.8
	2 <sup>[6]</sup>	北京	一维压缩试验	回弹模量	0.36~0.63	0.75~0.96
	3 <sup>[8]</sup>	上海	一维压缩试验	回弹变形	—	0.8
	4 <sup>[9]</sup>	天津	一维压缩试验	回弹变形和回弹模量	0.2	0.9
	5 <sup>[10]</sup>	无锡	一维压缩试验	扰动度	—	0.81
	6 <sup>[11]</sup>	上海	直剪试验	抗剪强度	0.43	0.64 <sup>*a</sup>
	7 <sup>[12]</sup>	天津	直剪试验	抗剪强度	—	0.70~0.85 <sup>*b</sup>
	8 <sup>[13]</sup>	上海	一维压缩试验	回弹模量	0.21~0.38	0.65~0.83
	9 <sup>[14]</sup>	上海	三轴试验	回弹模量	0.20~0.50	0.67~0.88
	10 <sup>[15]</sup>	上海	—	残余应力	0.02~0.03 <sup>*c</sup>	—
	11 <sup>*d</sup>	福州	一维压缩试验	回弹变形	0.2	0.8
粉土	12 <sup>[5]</sup>	无锡	一维压缩试验	回弹变形	—	0.8
		无锡	现场实测 (CPTU)	锥尖阻力	—	0.76
		常州	现场实测 (CPTU)	锥尖阻力	—	0.82
砂土	2 <sup>[6]</sup>	—	一维压缩试验	回弹模量	0.40~0.60	0.88~0.96
	11 <sup>*d</sup>	—	一维压缩试验	回弹变形	0.2	0.7
	12 <sup>[5]</sup>	南京	一维压缩试验	回弹变形	—	0.8
	12 <sup>[5]</sup>	南京	现场实测 (CPTU)	锥尖阻力	—	0.83
	12 <sup>[5]</sup>	常州	现场实测 (CPTU)	锥尖阻力	—	0.79
	13 <sup>[7]</sup>	—	一维压缩试验	残余应力	0.2	—
泥炭土	14 <sup>[16]</sup>	昆明	一维压缩试验	回弹变形	0.5	0.9
冲填土	15 <sup>[17]</sup>	—	离心试验	回弹变形	0.4	0.9

注： \*a. 与预压时间有关； \*b. 扰动区边界土体视为卸荷量达到极限卸荷比状态； \*c. 地层假定为饱和状态，残余应力影响最大深度处视为土体卸荷量达到临界卸荷比状态； \*d. 本文结果。

3 不同土类卸荷比特征值

为对比不同地层中土体卸荷比特征值，本文对 15 个有关卸荷比特征值的卸荷试验进行归纳总结。统计案例包括不同地区黏性土、粉土、砂土、泥炭土和冲填土的试验结果，具体见表 3。

单元体试验主要有直剪试验、一维压缩试验、三轴试验等。除室内试验外，通过现场实测<sup>[5]</sup>获取土体原位应力状态与力学特性也可以确定土体卸荷比特征值。既有研究中，卸荷比特征值均基于试验土体力学指标变化而确定。以室内试验为例，多数研究<sup>[4, 6-8]</sup>依据卸荷下土体回弹变形、回弹模量和抗剪强度等物理量衰减变化的“拐点”确定临界卸荷比  $R_{cr}$  与极限卸荷比  $R_u$ 。随卸荷比增加，各类土体均表现出相似的三阶段变形响应规律，即当卸荷水平处于临界卸荷比  $R_{cr}$  以下时土体响应可以忽略不计，而当卸荷水平达到极限卸荷比  $R_u$  时土体回弹变形和回弹模量显著增大和减小。

试验确定的卸荷比特征值与土体初始组构状态和应力历史等密切相关。例如，案例 6 中指出黏土的临界卸荷比  $R_{cr}$  与试样固结时长呈正相关<sup>[11]</sup>，案例 4 中发现当初始预压荷载过大时，卸荷后试样的回弹变形甚至小于次固结沉降<sup>[9]</sup>。此外，结构性较差的泥炭土和冲填土的卸荷比特征值明显大于其他案例结果<sup>[16-17]</sup>。

而本文试验结果也表明，不同预压荷载下福州粉质黏土归一化回弹变形更离散，极限卸荷比  $R_u$  略大于福建标准砂。

不同地层中卸荷比特征值的具体数值是确定坑底卸荷扰动区的重要指标。对于黏性土、粉土、砂土、泥炭土和冲填土试验案例，临界卸荷比  $R_{cr}$  平均值分别为 0.27，无，0.30，0.50，0.40，极限卸荷比  $R_u$  平均值分别为 0.79，0.79，0.81，0.90，0.90。考虑到统计数量有限且各案例试验条件不同，不同土体间卸荷比特征值的差别仍有待进一步研究。实际基坑工程可基于土体极限卸荷比  $R_u$  和临界卸荷比  $R_{cr}$  预测坑底强扰动区（松动区）和弱扰动区（土拱区）范围，为控制基坑下方既有地下结构变形提供参考。

4 结 论

基于福建标准砂和福州粉质黏土开展了竖向卸荷试验，总结了既有研究中黏性土、粉土和砂土等土体的卸荷比特征值，主要得到以下 3 点结论。

(1) 竖向卸荷试验中土体回弹变形表现出三阶段变化规律。根据各阶段“拐点”确定福建标准砂和福州粉质黏土的临界卸荷比  $R_{cr}$  均为 0.20，极限卸荷比  $R_u$  分别为 0.70，0.80。受预压荷载影响，福建标准砂的卸荷比特征值与初始相对密实度无明显关系。

(2) 卸荷比  $R$  小于临界卸荷比  $R_{cr}$  时，土体响应

可以忽略不计。卸荷比  $R$  大于极限卸荷比  $R_u$  时, 土体归一化回弹变形、侧压力系数快速增加, 回弹模量、剪切模量显著弱化, 水平残余应力比出现拐点且开始下降。

(3) 根据 15 个案例统计结果, 黏性土、粉土、砂土、泥炭土和冲填土的临界卸荷比  $R_{cr}$  平均值分别为 0.27, 无, 0.30, 0.50, 0.40, 极限卸荷比  $R_u$  平均值分别为 0.79, 0.79, 0.81, 0.90, 0.90。实际基坑工程可基于土体极限卸荷比  $R_u$  和临界卸荷比  $R_{cr}$  预测坑底强扰动区(松动区)和弱扰动区(土拱区)范围。

### 参考文献:

- [1] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2085-2092. (ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi, WANG Weidong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2085-2092. (in Chinese))
- [2] MENG F Y, CHEN R P, XU Y, et al. Contributions to responses of existing tunnel subjected to nearby excavation: a review[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, **119**: 104195.
- [3] 郭鹏飞, 杨龙才, 周顺华, 等. 基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 2): 613-621. (GUO Pengfei, YANG Longcai, ZHOU Shunhua, et al. Measurement data analyses of heave deformation of shield tunnels due to overlying pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 613-621. (in Chinese))
- [4] 潘林有, 胡中雄. 深基坑卸荷回弹问题的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 101-104. (PAN Linyou, HU Zhongxiong. Experimental study on the resilience of pit under unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(1): 101-104. (in Chinese))
- [5] 李 赞, 刘松玉, 吴 恺, 等. 基于多功能 CPTU 测试的基坑开挖扰动深度确定方法[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(1): 181-187. (LI Zan, LIU Songyu, WU Kai, et al. Determination of disturbance depth due to excavation using multifunctional CPTU tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(1): 181-187. (in Chinese))
- [6] 李建民. 超深超大基坑回弹变形计算方法的试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2010. (LI Jianmin. Research on the Calculation Method of Resilient Deformation in Ultra-Deep Foundation Pit[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2010. (in Chinese))
- [7] 孙永, 周顺华, 庄 丽. 考虑残余应力的基坑被动区土压力及强度计算[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(9): 94-99. (SUN Yuyong, ZHOU Shunhua, ZHUANG Li. Calculation of passive earth pressure and shear strength in foundation pits considering residual stress[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(9): 94-99. (in Chinese))
- [8] 秦爱芳, 胡中雄, 彭世娟. 上海软土地区受卸荷影响的基坑工程被动区土体加固深度研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 935-940. (QIN Aifang, HU Zhongxiong, PENG Shijuan. Depth of soil stabilization in passive area of foundation pits for Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 935-940. (in Chinese))
- [9] 张淑朝, 张建新, 张 阳, 等. 基坑开挖卸荷土体回弹实验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊 1): 426-429. (ZHANG Shuchao, ZHANG Jianxin, ZHANG Yang, et al. Experimental study on rebound of clay due to foundation excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S1): 426-429. (in Chinese))
- [10] 鲁泰山, 刘松玉, 蔡国军, 等. 软土地层基坑开挖扰动及土体再压缩变形研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(2): 565-573, 580. (LU Taishan, LIU Songyu, CAI Guojun, et al. Study on the disturbance and recompression settlement of soft soil induced by foundation excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(2): 565-573, 580. (in Chinese))
- [11] 潘林有, 程玉梅, 胡中雄. 卸荷状态下粘性土强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2001, **22**(4): 490-493. (PAN Linyou, CHENG Yumei, HU Zhongxiong. Experimental study on the shear strength of clay under the unloading state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(4): 490-493. (in Chinese))
- [12] 陈 昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(4): 1075-1082. (CHEN Kun, YAN Shuwang, SUN Liqiang, et al. Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation unloading condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(4): 1075-1082. (in Chinese))
- [13] 邓指军, 贾 坚. 地铁车站深基坑卸荷回弹影响深度的试验[J]. 城市轨道交通研究, 2008, **11**(3): 52-55. (DENG Zhijun, JIA Jian. On unloading resilience depth in deep station foundation pit[J]. Urban Mass Transit, 2008, **11**(3): 52-55. (in Chinese))
- [14] 李德宁, 楼晓明, 杨 敏. 上海地区基坑开挖卸荷土体回弹变形试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 244-249. (LI Dening, LOU Xiaoming, YANG Min. Experimental



- researches on unloading resilient deformation properties during excavations in Shanghai area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(S2): 244-249. (in Chinese))
- [15] 刘国彬, 侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J]. *地下工程与隧道*, 1996(2): 1-7. (LIU Guobin, HOU Xueyuan. Residual stress analysis method of foundation pit in soft soil foundation pit[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 1996(2): 1-7. (in Chinese))
- [16] 张帆舸, 黄昌富, 姚铁军, 等. 泥炭土压缩及回弹变形规律试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(增刊 2): 259-262. (ZHANG Fange, HUANG Changfu, YAO Tiejun, et al. Experimental study on laws of compression and rebound deformation of peaty soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(S2): 259-262. (in Chinese))
- [17] 杨 坪, 唐益群, 马险峰, 等. 冲填土卸荷回弹变形离心模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007(增刊 2): 4258-4263. (YANG Pin, TANG Yiqun, MA Xianfeng, et al. Study on unloading rebound deformation of dredger fill with centrifuge modeling test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007(S2): 4258-4263. (in Chinese))
- [18] 楼晓明, 李德宁, 刘建航. 深基坑坑底地基的回弹应力与回弹变形[J]. *土木工程学报*, 2012, **45**(4): 134-138. (LOU Xiaoming, LI Dening, LIU Jianhang. Rebound stress and deformation below the bottom of deep excavations[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, **45**(4): 134-138. (in Chinese))
- [19] MEND F Y, CHEN R P, XIE S W, et al. Observed behaviors of a long and deep excavation and collinear underlying tunnels in Shenzhen granite residual soil[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, **103**: 103504.
- [20] 城市轨道交通结构安全保护技术规程: DB33/T1139—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. (Technical Code for Protection of Urban Rail Transit Structures: DB33/T1139—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese))
- [21] 既有轨道交通盾构隧道结构安全保护技术规程: T/CCES 36—2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022. (Technical Code for Protection of Existing Shield Tunnels of Rail Transit: T/CCES 36—2022[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022. (in Chinese))
- [22] YUN T S, EVANS T M. Evolution of at-rest lateral stress for cemented sands: experimental and numerical investigation[J]. *Granular Matter*, 2011, **13**(5): 671-683.
- [23] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [24] 刘宏扬, 罗 强, 周 鑫, 等. 路基压实粉质黏土水平残余应力估算方法探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(8): 1710-1718. (LIU Hongyang, LUO Qiang, ZHOU Xin, et al. Discussion on estimation method of horizontal residual stress of subgrade compacted silty clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(8): 1710-1718. (in Chinese))
- [25] 付龙龙, 周顺华, 王长丹, 等. 局部加卸载下立方体阵列接触力残留的细观特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(12): 2981-2989. (FU Longlong, ZHOU Shunhua, WANG Changdan, et al. Mesoscopic characteristics of residual contact force in block array subjected to partial loading and unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(12): 2981-2989. (in Chinese))
- [26] 庄 丽, 周顺华. 砂的静力加卸载试验和应力释放模型研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(9): 2667-2673, 2685. (ZHUANG Li, ZHOU Shunhua. Static loading-unloading test of sand and stress release model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(9): 2667-2673, 2685. (in Chinese))
- [27] MAYNE P W, KULHAWY F H.  $K_0$ -OCR relationship in soil[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1982, **108**(6): 851-72.
- [28] HARDIN B O. Vibration modulus of normally consolidated clay[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, **94**(2): 353-370.
- [29] MEND F Y, CHEN R P, XIE S W, et al. Excavation-induced arching effect below base level and responses of long-collinear underlying existing tunnel[J]. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2022, **123**: 104417.